干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

季节性冻土水热对融雪及气温的响应

古力米热·哈那提[1]， 张 音[2,3]， 苏里坦[2]， 胡可可[2,3]

（1. 新疆水利水电科学研究院，新疆 乌鲁木齐 830049；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049）

摘 要：近年来，随着气候变化，伊犁河谷积雪消融加快，极端水文事件的频度和强度也在加大。通过利用中国科学院天山积雪站附近小流域的土壤水热和积雪融雪观测数据，对研究区积雪消融规律、冻土水热变化特征及其对气温和融雪量的响应进行了分析。结果表明：在冻土融解阶段，土壤温度的变化依赖大气温度的变化，而土壤水分受融雪量和气温的影响较大，高度相关。表层土壤含水率的变幅最大，而深层土壤水分值较稳定，土壤水热的季节性变化自秋–冬–春大致呈现"下降–平稳–上升"的趋势。在冻土层上边界，土壤含水率随着累积融雪量的增加而增加并达到饱和值，而冻土层下边界（40 cm深度）土壤水分保持非饱和稳定状态。在山区，降雪量是水资源形成的主要来源。融雪量与大气温度的相关性显著（系数为0.785），融雪量对水资源形成的贡献率为40%左右。研究冻土水热对融雪和气温的响应过程，对于新疆水资源形成机理、转化利用以及洪水预报具有重要的参考价值。

关 键 词：季节性冻土；土壤水热；雪水当量；气温；冻融过程

文章编号：

在多年冻土和季节冻土区，地表土层随气温变化反复冻结和融化，这一过程叫做土壤的冻融循环[1]，主要包括水热传输、盐分的积聚等物理和化学现象。积雪是一种特殊的覆被，也是一种重要的淡水资源，是干旱与半干旱地区重要的土壤水分补给源[2]。近几十年，全球变暖[3-5]，积雪融化加速，冻土层也在不断减退，成为国内外专家学者的研究热点[6-8]。

土壤水热迁移是一个土壤水分和热量相互作用、相互影响的过程[9]。杨绍富等[10]用2006年天山北坡军塘河流域融雪期的土壤水热及气温数据分析土壤水热变化，发现二者有较高的相关性。Cheng等[11]认为季节性冻土土壤水热变化与植被覆盖度有一定的关系。已有研究表明积雪沉积的时间和厚度变化会影响土壤的霜冻深度和土壤水分动态的变化情况[12]。陈渤黎等[13]采用CLM模式研究了青藏高原的土壤冻融过程。陈枭萌等[14]研究了古尔班通古特沙漠季节性冻土的水热作用机制，认为在土壤冻结融化时，各层土壤水分与环境温度变化趋势一致，但随土层深度的增加逐渐减弱。伊犁地区有关研究证明，土壤冻结深度和土壤冻融历时与不同海拔温度和积雪的作用显著相关[15]。关于近30 a来黄河和长江土壤冻融对流域径流动态的作用机理一文中研究发现，土壤冰在季节性冰雪融化径流中起着关键作用[16]。上述研究主要针对不同时期季节性冻土的变化情况及其影响因素进行了研究，而对于不同冻融阶段土壤水热的变化研究较少，因此基于土壤不同冻融阶段的相关研究很有必要。

积雪的自身特性及融雪过程的研究对水文、气象及环境领域都十分重要。积雪的导热性弱、反射率高、热容量大，对地气之间的相互作用具有

收稿日期：2020-07-10； **修订日期**：2020-09-29
基金项目：新疆少数民族特培项目（2019D03004）；国家自然科学基金项目（41961002，U1603342）和新疆水利科技专项项目（403-1301-JSN-5MIR）资助
作者简介：古力米热·哈那提（1976-），女，高级工程师，主要从事干旱区水资源规划与水文过程研究. E-mail: skyglml@163.com
通讯作者：苏里坦（1972-），男，研究员，博导，主要从事水文学研究. E-mail: sulitan@ms.xjb.ac.cn

重要的影响力,能够改变二者之间的能量交换与温度传递[17]。积雪消融与气温的变化过程关系紧密,正变温对积雪消融更为有利[18]。目前,随着科学技术的发展,自动观测仪器也在不断更新,高原地区积雪形态、动态过程及水文气象交互影响的研究逐步开展[19-21]。

在新疆西天山的高寒山区,由于地形复杂,基础观测工作缺乏,有关土壤水热及其动态过程的研究报道尚不多见。本文拟利用伊犁河谷典型小流域野外实验室土壤水热数据、积雪融雪观测数据,划分土壤冻融阶段,并结合积雪消融过程,探讨流域动态融雪过程、土壤水热变化特征及其对融雪量与气温的响应,揭示山区土壤水热在气温变化条件下的变化规律,为复杂地形及高寒山区的土壤水热变化模拟提供一定的理论基础和技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于天山北坡西段,中国科学院新疆生态与地理研究所天山积雪站西侧的野外实验流域,实验小流域面积为26 km^2,流域海拔梯度在1100~3000 m之间,平均海拔2050 m,流域内不同海拔高度设有5个测站,最高测站海拔为2120 m,出山口水文站海拔1175 m。该流域气候温和湿润,多年平均气温8.7 ℃,流域最高气温与最低气温分别为29.2 ℃、-23.6 ℃,多年平均降水量和融雪量分别为369 mm、254 mm,多年平均辐射量为4825 MJ·m^{-2}·a^{-1},具有鲜明的半干旱区水文特征。

2 材料与方法

本研究中所用的积雪融雪相关数据源包括气象数据、降雪数据、融雪数据、雪面温度数据和地表温度数据。综合考虑土壤冻融变化特征和数据的完整性,选取2017年9月1日至2018年8月31日期间(完整的1个水文年)的数据作为分析数据。

2.1 气象数据

气象数据采集CAMBELL气象站,观测要素主要有大气温湿度、太阳净辐射、降雨量、水气压、日照时数、风速、风向等。气象数据用CR1000型数据采集器每隔30 min自动采集。

2.2 雪水当量

雪水当量(SWE)采用德国Sommer公司研发的SSG雪水当量测量仪自动测量。SSG雪水当量测量仪是一款精密的雪水当量测量装置,特别适合于高寒山区融雪量的自动监测。SSG雪水当量测量仪是通过重量传感器来计算融雪量,而降雪量数据是采用来自挪威的T-200B型称重式雨雪量计测定,其自动观测间隔设为30 min一次,每日可测定48个数据量,观测时段与气象数据的观测是同步的。

2.3 雪面温度

雪面温度采用美国Apogee公司的SI-111型红外地表温度传感器自动测定,测定时间间隔为30 min,与自动气象站的测定时间保持同步。

2.4 土壤水热

土壤水热数据采用来自澳大利亚Steven公司开发的Hydra测定仪自动测定,测定时间步长与其他观测项目同步(30 min)。

3 结果与分析

3.1 积雪消融规律分析

新疆地处干旱与半干旱地区,气候干燥、降雨稀少,积雪作为一种重要的覆被,其融雪水成为新疆重要的水资源之一,同时也是绿洲水资源的主要来源。研究发现,阿热都拜流域在2017年12月27日至2018年3月8日处于稳定积雪期,因此本研究选取这一时间段实验站观测的融雪数据,对该地区的积雪消融规律进行分析(图1)。

在影响融雪的众多因素中,其中贡献率最大的因素为环境温度。由图1可知,融雪量的动态变化过程与大气温度、地表温度和雪面温度密切相关,其变化的总体趋势与环境温度的波动同步共振,根据融雪数据和同步的大气温度、地表温度、雪面温度数据序列间的Pearson相关系数发现,融雪量与大气温度、地表温度、雪面温度显著相关,分别为0.785、0.631、0.704,且都达到了0.01水平。积雪吸收太阳辐射和地面辐射,导致雪层温度升高,发生消融现象。

3.2 累积雪水当量变化规律

流域降水主要包括降雨与降雪,二者的生态功能过程不同,因此在探索融雪变化规律时,要将降雨与降雪分开考虑。由图2可知,在山区,降雪量是水资源形成的主要来源,降雪量约占降水量的40%(本实验区占39.4%,图2),而年降雨量仅占全年降

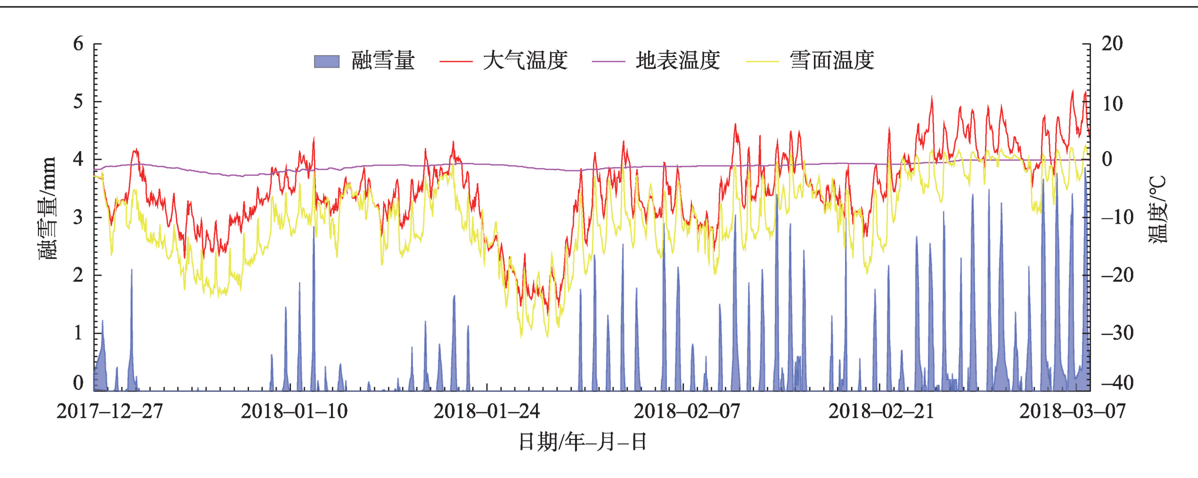


图1　融雪量与温度的关系

Fig. 1　Relationship between snowmelt and ambient temperature

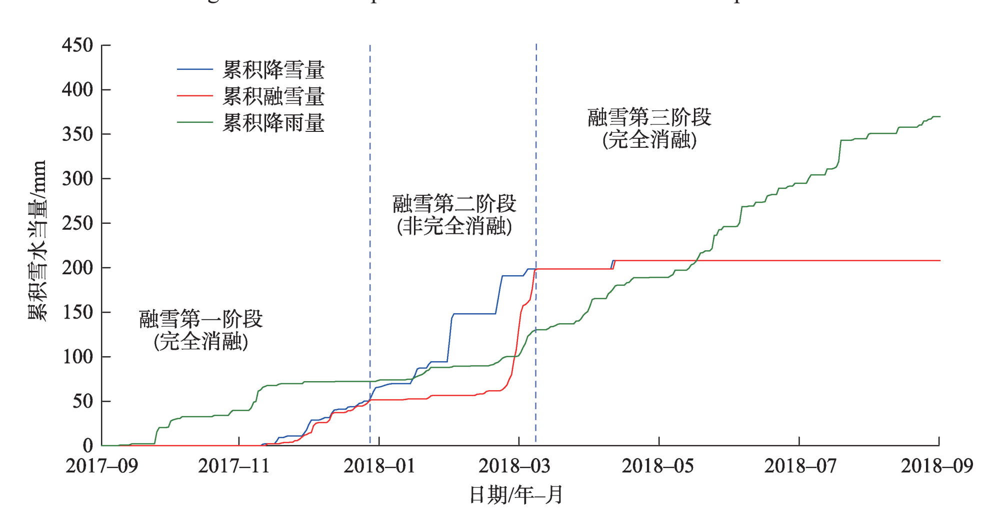


图2　积雪消融变化规律

Fig. 2　Change of snow cover ablation

水量的60%左右。结合图1和图2发现，融雪量不仅与温度、辐射等因素有关，还与降雪量有关，二者的关系表现为正相关。

通过监测分析发现，融雪变化过程主要分为3个阶段，第一阶段为完全消融阶段（2017年11月上旬至12月底），此时降雪量和融雪量都较少，累积融雪量与累积降雪量曲线几乎重合，即积雪完全消融；第二阶段为非完全消融阶段（2017年12月至2018年3月初），由于降雪量的增加和气温的持续降低，使得累积降雪量大于融雪量，地表发生稳定积雪，并未完全消融；第三阶段为完全消融阶段（2018年3月初之后），此时累积融雪量等于累积降雪量，积雪处于完全消融阶段。

3.3　土壤水热对融雪及气温的响应

3.3.1　土壤水热变化特征　为了解各层土壤水热的变化情况，利用2017年11月至2018年3月研究区整个冻结融化期的土壤水热数据，绘制了各层土壤水热变化趋势图（图3）。从图3a可以看出，在研究时段中，整体各层土壤温度值变化一致，大致呈先降低后升高的趋势，这与气温的变化特征相似（图3b）。在土壤冻结过程中，随气温下降土壤温度逐渐降低，这一阶段，降雪量大于融雪量。在垂直方向上，随着土层深度的增加土壤温度逐渐升高。其中表层土壤温度最低，受气温影响波动最明显，深层土壤温度变化幅度小，150 cm深度处的土壤温度值最大，温度曲线也最为光滑。在土壤消融过程中，积雪融化，地表出露，土壤温度整体随气温的上升逐渐升高，且表层温度受气温影响最大，升温较快，深层土壤波动幅度小。

从土壤的体积含水率变化曲线可以看出（图3c），观测期土壤含水率波动较显著。由于受积雪消融的影响，表层（0~20 cm）土壤含水率变幅最大，深

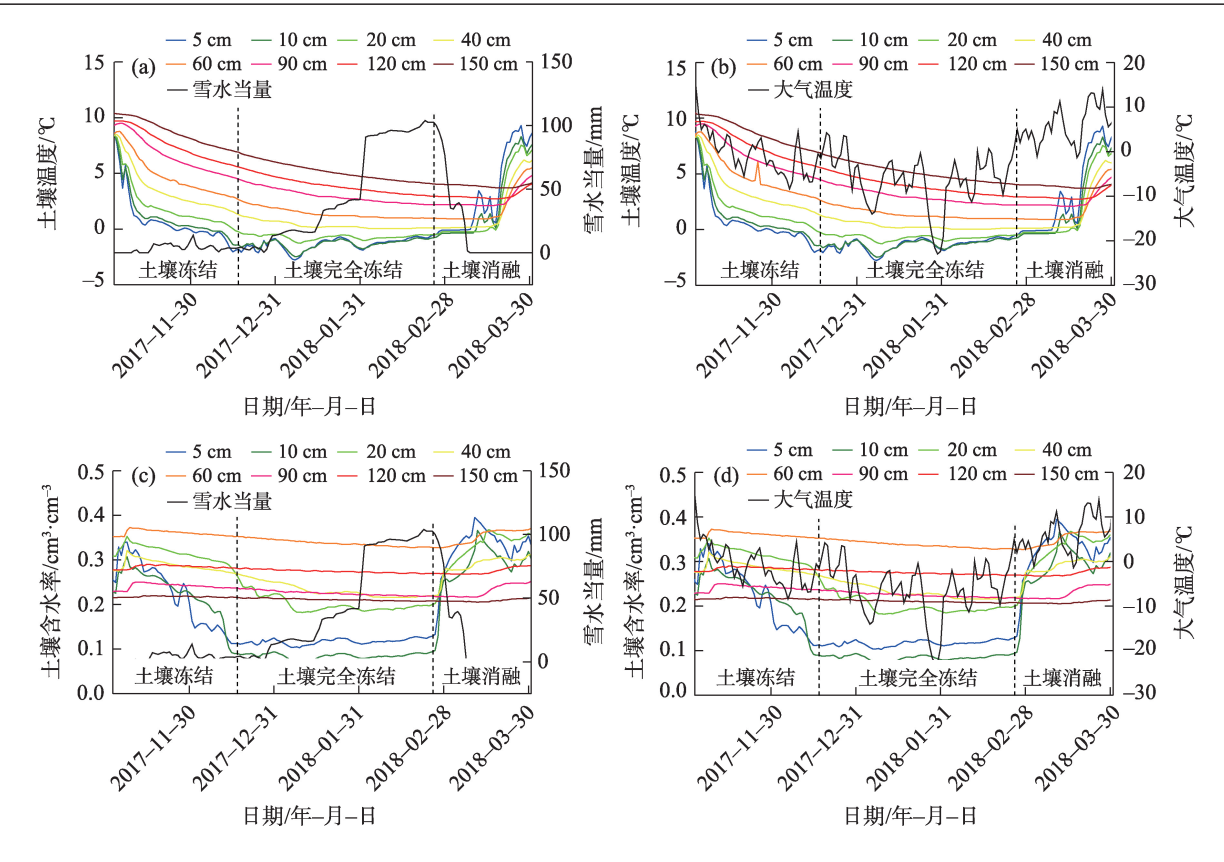


图3 冻土各层土壤水热与雪水当量和大气温度的关系

Fig. 3 Relationship of soil temperature and humidity with snow water equivalent and atmospheric temperature in frozen soil layer

层(150 cm及以下)土壤含水率较平稳,几乎不受外界环境(温度、降水等)的影响,研究区土壤水库的深度不超过150 cm,土壤水分主要集中在60 cm深度处(图3c、3d)。与此同时,通过实验区雪枕仪观测到的雪水当量(102 mm)数据与150 cm以内土层的储水量(38 mm)数据对比可推测,剩余地表积雪融化入渗到土壤水库的雪水以壤中流的形式排至河谷。随着气温的迅速回升,大量融雪水入渗到土壤,冻土层土壤水分迅速升高。由图3c可见,积雪快速消融与土壤水分迅速上升的时段完全重合,这进一步揭示了天山北坡融雪水大部分以入渗的方式补给土壤,进而产生壤中流。通过出山口水文站的径流观测数据可知,河谷水流量在年内无明显变化,由此得知春季大范围融雪水几乎不产生坡面流,大部分以入渗的形式补给地下水,因此融雪水对土壤水的贡献率远大于降雨入渗。

综上可知,在土壤的冻融阶段,土壤温度与气温的变化趋势一致,土壤含水率随积雪消融而变化,且土壤水热变化与土层深度密切相关,随土层深度的增加而减弱,深层土壤基本不受外界环境的影响,这与陈枭萌等[14]的研究结果是一致的。

3.3.2 土壤水热耦合关系 已有研究发现[7,22],土壤水分与土壤温度密切相关。土壤温度的变化直接影响着土壤水分含量、土壤水分运动及其变化。由图3c、图3d可知,在冻结融化期(2017年11月至2018年3月),冻土层(0~40 cm)土壤温度与水分的变化比较活跃,受气温和融雪量的影响较大,为此本研究利用这一时段冻土层的土壤水热数据建立回归模型,如图4所示。

由表1可见,在冻融时期,各层土壤温度与土壤水分显著相关,其中10 cm土层的土壤水热之间的相关性最好,R^2最高为0.789,二者耦合效应最强。5 cm土层由于受气温、积雪等外界影响较大,耦合关系相对较弱。整体上,R^2随着深度的增加逐渐减小,土壤水热耦合效应也相应减弱。

3.3.3 土壤水热对融雪及气温的响应 研究发现,融雪量和大气温度的变化直接影响土壤水分和温度变化,本研究以野外实验站日观测数据为基础,给出了冻土层不同深度土壤水热与大气温度和融雪量的关系图(图5)。

截取2017年11月至2018年3月土壤冻融期的实验站数据,分析土壤温度对大气温度的响应程

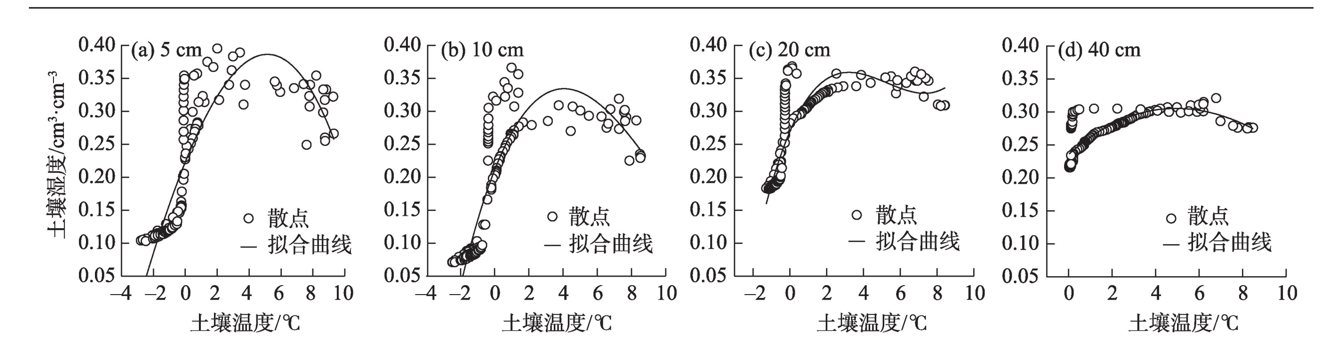


图4 冻融期土壤水热耦合关系曲线

Fig. 4 Curve of soil temperature and humidity coupling during freezing and thawing period

表1 冻融期土壤水热耦合关系回归方程

Tab. 1 Regression equation of soil temperature and humidity coupling relationship during freezing and thawing period

土层深度/cm	土壤水热回归方程	残差平方和	R^2
5	$y=-1\times10^{-4}x^3-0.0048x^2+0.0601x+0.2226$	0.334	0.760
10	$y=3\times10^{-4}x^3-0.0102x^2+0.0662x+0.2111$	0.279	0.789
20	$y=9\times10^{-4}x^3-0.0147x^2+0.0656x+0.2687$	0.141	0.772
40	$y=5\times10^{-5}x^3-0.0033x^2+0.0295x+0.2356$	0.065	0.591

度，由图5a~d可知，二者为正相关关系，且随着土层深度的增加，土壤温度与大气温度的相关性也在逐渐降低，其中5 cm土壤温度与气温的相关性最强，R^2=0.693（相关性系数R=0.832）。由于气温和太阳辐射随着深度的增加逐渐削弱，因此受气温的影响，表层土壤波动明显，深层土壤温度趋于稳定。

研究区积雪的全面消融发生在2018年2月26日之后，在此之前，由于土壤处于冻结状态，融雪水对土壤含水率的影响很小，3月8日之后，积雪完全消融，因此本研究选取这一时段的土壤含水率和融雪量，对其进行相关性分析（图5e~h）。研究区冻土层土壤水分的主要来源是积雪消融，气温升高，积雪消融后的融雪水入渗到土壤，进而增加了土壤含水率。而深层土壤由于上层土壤的保护作用，水分

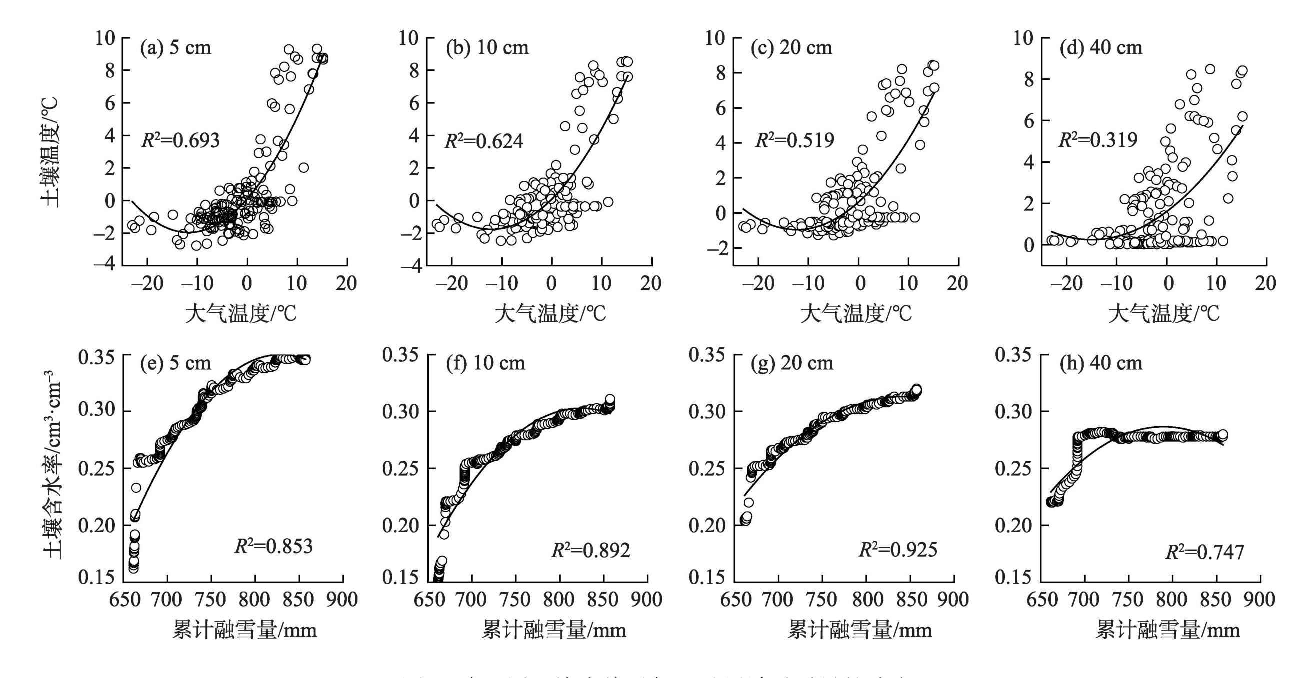


图5 冻土层土壤水热对气温及累计融雪量的响应

Fig. 5 Response of soil temperature and humidity to temperature and accumulated snowmelt in frozen soil layer

被截留,因此含水率较为稳定。由土壤水分对累计融雪量的响应可知,土壤含水率和累积融雪量呈显著正相关,5 cm、10 cm、20 cm和40 cm深度的土壤含水率与累积融雪量的相关性系数R^2分别为0.853、0.892、0.925和0.747,其中20 cm深度处土壤水分与累积融雪量的相关性最高,R^2=0.925(相关性系数R=0.962)。从图5e~h的变化规律可见,5 cm、10 cm、20 cm深度土壤含水率随着累积融雪量的增加而增加,而40 cm深度土壤水分并不随着累积融雪量的持续增加而增加,保持稳定的含水率,但是并没有达到饱和值,这种现象说明了融雪水在土壤浅表层发生壤中流。

总结以上结果可知,在影响融雪的众多因素中,其中贡献率最大的因素为环境温度,包括大气温度、雪面温度和地表温度,而雪面温度在很大程度上会依赖大气温度。积雪吸收太阳辐射导致雪层温度升高,发生消融现象,因此,气温和太阳辐射是积雪产生融化的主要驱动因素。本研究重点探讨了伊犁阿热都拜小流域冻土层土壤水热特征及其对气温和融雪的响应,至于其内部的响应机理还有待进一步研究探讨。

4 结 论

本研究利用伊犁阿热都拜流域野外实验站测定的土壤水热数据与积雪融雪数据,揭示山区积雪消融变化规律及土壤水热变化特征,并探讨了土壤水热与气温和融雪量之间的关系。基于2017—2018年积雪期山区土壤冻结融化时期土壤水热对融雪和气温的响应,得出以下结论:

(1) 研究发现,融雪量的动态变化过程与大气温度、地表温度和雪面温度显著相关,分别为0.785、0.631、0.704,相关性水平在0.01以上。

(2) 融雪变化过程主要分为3个阶段,第一阶段为完全消融阶段(2017年11月上旬至12月底),此时降雪量和融雪量都较少,累积融雪量等于累积降雪量;第二阶段为非完全消融阶段(2017年12月底至2018年3月初),累积降雪量大于融雪量;第三阶段为完全消融阶段(2018年3月初之后),此时累积融雪量等于降雪量,积雪完全消融。因此,降雪量成为山区水资源形成的主要来源。

(3) 在土壤冻结融化期,整体上各层的土壤温度值变化一致,大致先降低后升高,其中5 cm深度处的土壤温度值最小,且波动明显,随着深度的增加波动幅度减小,150 cm处的土壤温度值最大,温度曲线最为光滑稳定;与温度相同,表层土壤含水率变幅最大,大致呈“下降-平稳-上升”的趋势,深层土壤水分值趋于稳定。在土壤冻结消融期间,各层土壤温度与土壤水分之间显著相关,其中10 cm处土壤水热的耦合关系最好。

(4) 融雪量和大气温度的变化直接影响土壤水分和温度变化。随着深度的增加,土壤温度与大气温度二者的相关性逐渐降低,响应强度减弱;土壤水分与融雪量的关系为显著正相关,20 cm深度处土壤水分与累积融雪量的相关性最高,相关性系数达0.962。与土壤温度与大气温度的相关性相比,土壤含水率与融雪量相关性更高,表明土壤水分的变化主要受入渗的融雪水量。根据雪水当量的变化与土壤水分运动的分析,融雪水在土壤浅表层(冻土层下边界)发生壤中流。

参考文献(References)

[1] 冉洪伍, 范继辉, 黄菁. 冻融过程土壤水热力耦合作用及其模型研究进展[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 991-999. [Ran Hongwu, Fan Jihui, Huang Jing. Review of the coupling of water and heat in the freeze-thaw process and its model of frozen soil[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(4): 991-999.]

[2] 王慧, 刘志辉, 张波. 干旱区季节性积雪融雪期含水率变化及其模拟——以新疆军塘湖流域为例[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 131-136. [Wang Hui, Liu Zhihui, Zhang Bo. Seasonal changes of snow moisture in arid area during snowmelt period and the simulation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(8): 131-136.]

[3] 张威, 王宁练, 李想, 等. 近20 a西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域冰川面积变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2019, 37(3): 347-358. [Zhang Wei, Wang Ninglian, Li Xiang, et al. Glacier changes and its response to climate change in the Gilgit River Basin, western Karakorum Mountains over the past 20 years[J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 347-358.]

[4] 蒋宗立, 王磊, 张震, 等. 2000—2014年喀喇昆仑山音苏盖提冰川表面高程变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 12-19. [Jiang Zongli, Wang Lei, Zhang Zhen, et al. Surface elevation changes of Yengisogat Glacier between 2000 and 2014[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 12-19.]

[5] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822-829. [Zhang Yin, Tuerxunbai Gulixian, Su Litan, et al. Spatial and tem-

poral characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822-829.]

[6] Li Changbin, Qi Jiaguo, Wang Shuaibing, et al. Spatiotemporal characteristics of alpine snow and ice melt under a changing regional climate: A case study in northwest China[J]. Quaternary International, 2015, 358: 126-136.

[7] Braithwaite R, Roger J. Temperature and precipitation climate at the equilibrium-line altitude of glaciers expressed by the degree-day factor for melting snow[J]. Journal of Glaciology, 2008, 186 (54): 437-444.

[8] 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 等. 气温变化条件下融雪速率和土壤水分变化的同步观测试验[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 890-897. [Guo Lingpeng, Li Lanhai, Xu Junrong, et al. Experimental study on simultaneous observation of snowmelt and soil moisture content under air temperature increase[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 890-897.]

[9] 刘继龙, 刘璐, 付强, 等. 黑土区玉米地土壤温度的时空变异性研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 31-35. [Liu Jilong, Liu Lu, Fu Qiang, et al. Spatiotemporal variation of soil temperature within a corn field in black soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 31-35.]

[10] 杨绍富, 刘志辉, 闫彦, 等. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 642-646. [Yang Shaofu, Liu Zhihui, Yan Yan, et al. Preliminary study on soil humidity and its relationships with soil temperature and air temperature in snow melting season[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(5): 642-646.]

[11] Cheng H, Wang G, Hu H, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River, China[J]. Environmental Geology, 2008, 54(8): 1755-1762.

[12] Iwata Y, Hayashi M, Suzukli S, et al. Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: A paired plot experiment[J]. Water Resources Research, 2010, 46(9): 2095-2170.

[13] 陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 等. 基于CLM模式的青藏高原土壤冻融过程陆面特征研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 760-770. [Chen Boli, Luo Siqiong, Lyu Shihua, et al. Land surface characteristics in soil freezing and thawing process on the Tibetan Plateau based on community land model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 760-770.]

[14] 陈枭萌, 文方, 顾宗斌, 等. 季节性冻土的水热作用机制研究——以古尔班通古特沙漠南缘为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 51-56. [Chen Xiaomeng, Wen Fang, Gu Zongbin, et al. Study on the hydrothermal mechanism of seasonal frozen soil: A case study about the southern margin of the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 51-56.]

[15] 郝建盛, 张飞云, 黄法融, 等. 新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 1-8. [Hao Jiansheng, Zhang Feiyun, Huang Farong, et al. Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in Ili[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 1-8.]

[16] Zheng Donghai, Velde R V, Su Zhongbo, et al. Impact of soil freeze-thaw mechanism on the runoff dynamics of two Tibetan rivers[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 382-394.

[17] 盛光伟, 肖鹏峰, 张学良, 等. 新疆天山及北疆地区积雪反照率差异[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 774-781. [Sheng Guangwei, Xiao Pengfeng, Zhang Xueliang, et al. Differences in snow albedo between Tianshan Mountains and northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 774-781.]

[18] 张威, 纪然. 辽宁朝阳地区季节冻土最大冻土深度和持续冻结时间与气候变化的响应研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 18-25. [Zhang Wei, Ji Ran. Response of maximum seasonally frozen depth and duration of soil frozen to climate change in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 18-25.]

[19] 周扬, 徐维新, 张娟, 等. 2013—2015年青藏高原玛多地区两次动态融雪过程及其与气温关系对比分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 101-133. [Zhou Yang, Xu Weixin, Zhang Juan, et al. A comparative analysis of the two dynamic snow-melting process and their relationship with air temperature during 2013—2015 in the area of Maduo, Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 101-133.]

[20] 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 24-32. [Zhou Yang, Xu Weixin, Bai Aijuan, et al. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe, Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(1): 24-32.]

[21] 张娟, 徐维新, 王力, 等. 三江源腹地玉树地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 936-945. [Zhang Juan, Xu Weixin, Wang Li, et al. Dynamic snow melting process and its relationship with air temperature in the hinterland of Sanjiangyuan region in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(4): 936-945.]

[22] 杨梅学, 姚檀栋, 丁永建, 等. 藏北高原D110点不同季节土壤温度的日变化特征[J]. 地理科学, 1999(6): 570-574. [Yang Meixue, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The daily variation of the soil temperature in different seasons at site D110 in the northern part of Xizang Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999(6): 570-574.]

Response of water and heat of seasonal frozen soil to snow melting and air temperature

Gulimire HANATI[1], ZHANG Yin[2,3], SU Litan[2], HU Keke[2,3]

（1. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China）

Abstract: In recent years, the speed of snow melting has accelerated due to climate change. Thus, the frequency and intensity of extreme hydrological events have also increased, and the Ili River Valley has become a high-incidence area in Xinjiang, China for spring snow-melting floods. This study attempts to analyze the dynamic process of snow melting, the characteristics of the change in water and heat in frozen soil and its response to temperature, and the amount of snow melting that occurs in a short time scale during the whole year's snow cover period by using the observed data regarding the soil temperature, humidity, and snow melting in the Araltobe watershed near the Tianshan Station for Snow Cover and Avalanche Research of the Chinese Academy of Sciences. The results show that the snow melting in mountain areas can be divided into three stages, namely, the complete ablation stage, the incomplete melting stage, and the complete ablation stage. During the frozen soil thawing stage, the change in the soil temperature depends on the atmospheric temperature, and the soil moisture is highly correlated with the snow melting and temperature. The change in the soil moisture content is greater in the surface layer, whereas it remains relatively stable in the deep layer. The seasonal change of soil temperature and humidity from autumn to winter to spring generally follows a "descending, stabilizing, and rising" trend. In the upper layer of the frozen soil, the soil water content increases with the increase of the snow melting until it reaches the saturation value, whereas in the lower boundary (40 cm) of the frozen soil, the soil water content does not increase with the continuous increase of the accumulated snowmelt, but rather, it maintains a stable unsaturated water content, which indicates that the soil flow occurs in the shallow surface layer (0−40 cm) after the snowmelt water infiltrates into the soil. Additionally, the results show that snowfall is the main source of water resources. The amount of snowmelt is significantly correlated with temperature (the correlation coefficient is 0.785), and the rate of the contribution of the snowmelt to the formation of the water resources is about 40%. The study of the response process of the frozen soil hydrothermal to the snowmelt and temperature is of important reference value in the formation mechanism of water resources and in the transformation and utilization of flood forecasting in Xinjiang.

Key words: seasonal frozen soil; soil temperature and humidity; snow water equivalent; air temperature; freeze-thaw process